



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8871>

#### **To cite this version :**

Sandra ZIMMER-CHEVRET, Laurent LANGLOIS, Julien LAYE, Jean-Claude GOUSSAIN, Claude GUYOMARD, Patrick MARTIN, Régis BIGOT - Potentiel du FSW pour la conception et réalisation de pièces moulées multimatériaux de forme complexe - In: Congrès français de mécanique (19 ; 2009 ; Marseille), France, 2009-08 - Congrès français de mécanique (19 ; 2009 ; Marseille) - 2009

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Potentiel du FSW pour la conception et réalisation de pièces moulées multimatériaux de forme complexe

## Application aux pièces en alliages d'aluminium moulés

SANDRA ZIMMER<sup>(a)</sup>, LAURENT LANGLOIS<sup>(a)</sup>, JULIEN LAYE<sup>(b)</sup>, JEAN-CLAUDE GOUSSAIN<sup>(b)</sup>, CLAUDE GUYOMARD<sup>(a)</sup>, PATRICK MARTIN<sup>(a)</sup>, REGIS BIGOT<sup>(a)</sup>

a. ARTS ET METIERS ParisTech Metz, Laboratoire de Conception Fabrication Commande, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz Cedex 03(France)

b. Institut de Soudure – centre FSW, 2-4 rue Pilâtre de Rozier, 57420 Goin (France)

### Résumé :

*Le soudage par friction malaxage (FSW) est un procédé de soudage de proche en proche à l'état solide. Ceci permet d'éviter la formation de certains défauts apparaissant lors de la solidification en soudage par fusion comme les fissures à chaud ou les soufflures. Dans le cas des alliages d'aluminium, ceci offre de grandes possibilités comme le soudage des alliages des séries 2000 (Al-Cu) et 7000 (Al-Zn) ainsi que les alliages de fonderie. En FSW, l'énergie de soudage est produite par le travail de l'interaction mécanique entre un outil et les pièces à assembler. La matière localement malaxée doit rester confinée autour de l'outil. Ces deux derniers points vont contraindre la conception des pièces à assembler et la gamme de soudage. Cet article présente les premiers résultats d'une étude du potentiel du FSW pour la réalisation de pièce de forme complexe, traditionnellement obtenue en fonderie. Ce travail n'aborde pas la reconception de produit mais traite des gammes de fabrication et de soudage en mettant en évidence les avantages et contraintes du procédé. Une démarche de conception de la gamme de soudage est proposée.*

### Abstract :

*Le soudage par friction malaxage (FSW) est un procédé de soudage de proche en proche à l'état solide. Ceci permet d'éviter la formation de certains défauts apparaissant lors de la solidification en soudage par fusion comme les fissures à chaud ou les soufflures. Dans le cas des alliages d'aluminium, ceci offre de grandes possibilités comme le soudage des alliages des séries 2000 (Al-Cu) et 7000 (Al-Zn) ainsi que les alliages de fonderie. En FSW, l'énergie de soudage est produite par le travail de l'interaction mécanique entre un outil et les pièces à assembler. La matière localement malaxée doit rester confinée autour de l'outil. Ces deux derniers points vont contraindre la conception des pièces à assembler et la gamme de soudage. Cet article présente les premiers résultats d'une étude du potentiel du FSW pour la réalisation de pièce de forme complexe, traditionnellement obtenue en fonderie. Ce travail n'aborde pas la reconception de produit mais traite des gammes de fabrication et de soudage en mettant en évidence les avantages et contraintes du procédé. Une démarche de conception de la gamme de soudage est proposée.*

**Mots clefs:** Friction Stir Welding, gamme de fabrication, alliage d'aluminium de fonderie, montage de soudage, moyens de production

## 1 Introduction

Le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) permet de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des pièces à assembler. Lors de l'établissement de la liaison métallurgique la température de fusion n'est pas atteinte ; la liaison est établie à l'état solide [1]. Ceci fait qu'il ne génère pas les défauts de soudage intervenant lors de la solidification du bain de fusion que sont les soufflures et les fissures à chaud. La nature solide du FSW fait de lui un procédé envisageable pour l'assemblage des alliages d'aluminium des séries 2000 (Al-Cu) et 7000 (Al-Zn).

L'échauffement de la matière et le malaxage sont assurés par l'action d'un outil en rotation. Celui-ci est composé d'un épaulement et d'un pion (voir figure 1). Le rôle de l'épaulement est de chauffer la matière par frottement et de la contenir autour du pion. Le rôle du pion est essentiellement de malaxer la matière. Il contribue également à l'échauffement de la matière par dissipation plastique.

Une opération de soudage se décompose en trois grandes phases. Une phase de plongée suivie de la phase de soudage à proprement parler puis une phase de retrait de l'outil. Les paramètres de pilotage du procédé FSW sont, lors de la phase de soudage, la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance et l'effort exercé sur l'outil suivant son axe (appelé effort de forgeage). A l'extrémité de la soudure il demeure un trou correspondant au volume occupé par le pion en fin de phase de soudage.

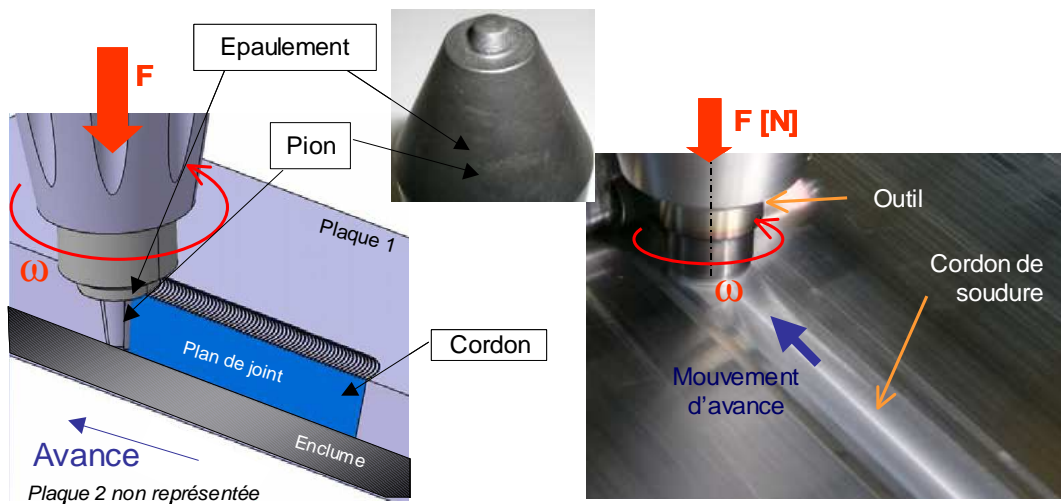


FIG. 1 – Principe du FSW [2]

Photo IS

Pour palier à certains défauts et/ou contraintes du FSW avec un outil conventionnel, deux autres technologies d'outils ont été conçues (Voir figure 2). Le deuxième outil possède un pion rétractable. Ceci permet de supprimer le trou en fin de soudage. Le troisième outil possède un deuxième épaulement. La matière malaxée est pincée entre les deux épaulements. Cette technologie permet de réaliser des soudures sans enclume. Ces deux outils nécessitent une technologie de broche plus complexe permettant la translation du pion dans l'épaulement.

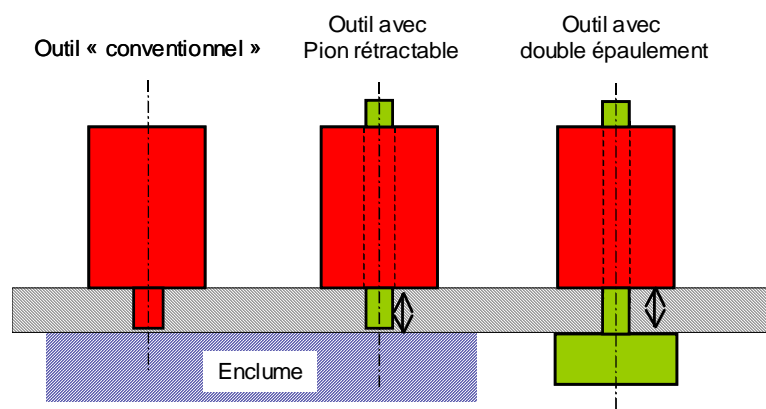


FIG.2 – Les trois technologies d'outil de FSW

L'interaction mécanique entre l'outil et la pièce sont à l'origine d'efforts importants. Ceci explique la structure rigide des machines dédiées au FSW. De même, le montage de soudage et le système de bridage doivent être dimensionnés pour supporter ces efforts.

Le processus de choix de la technologie de l'outil, de la machine de soudage et la conception du montage de soudage est donné sur la figure 3.

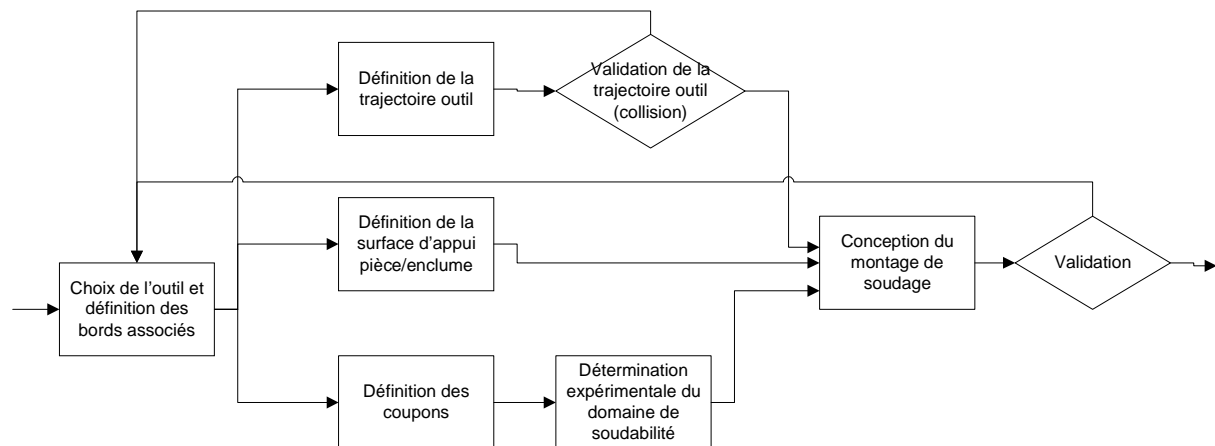


FIG.3 – Processus de choix de l'outil FSW et de conception du montage de soudage

On suppose ici connue la géométrie de la pièce finale et l'endroit approximatif des joints de soudure. Le premier élément à définir est la technologie et la géométrie de l'outil pour la réalisation des soudures. Celle-ci va être déterminante des préparations de bord et surtout de la nécessité ou pas de placer une enclume à l'envers de la soudure. De plus, cela permettra d'intégrer dès la conception, la surface d'accueil du ou des épaulement(s). Celle-ci doit être suffisante pour éviter que le matériau ne flue sous le passage de l'outil.

## 2 Démonstrateur

Le démonstrateur conçu pour cette étude est présentée sur la figure 4. Celui-ci a été conçu pour présenter plusieurs configurations caractéristiques et révélatrices du potentiel du FSW. La géométrie des pièces moulées est définie pour pouvoir être obtenue sans l'utilisation de noyaux interne ou externe. La réalisation de l'ensemble constitué du palier latéral et de la cloche en un seul tenant aurait nécessité l'utilisation d'un noyau intérieur et extérieur. L'utilisation de deux matériaux différents n'aurait pas été possible.

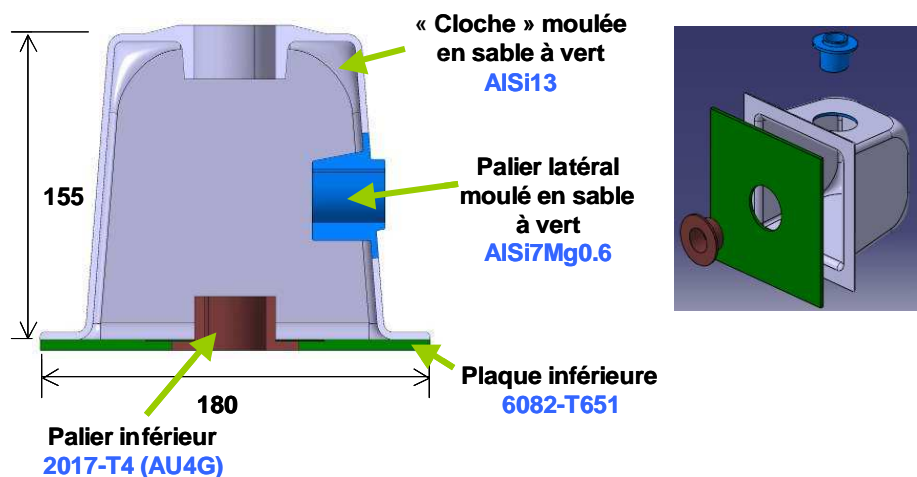


FIG.4 – Dessin du démonstrateur

De même que la géométrie du démonstrateur, les matériaux ont été choisis pour présenter des difficultés de soudage par des procédés par fusion.

Dans cet article, nous nous intéressons essentiellement à la soudure du palier latéral sur la cloche. La gamme de fabrication associée à cette soudure est décrite schématiquement sur la figure 5.

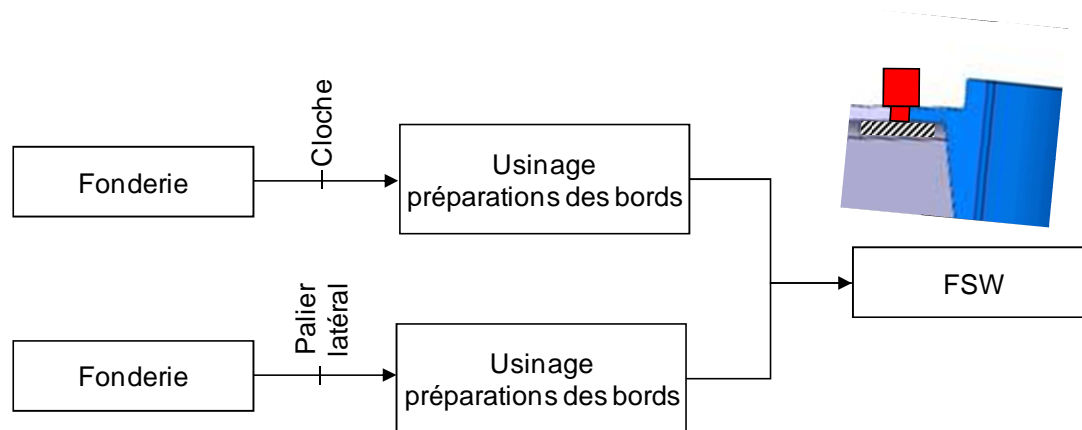


FIG.5 – Gamme de fabrication depuis l’obtention des pièces moulées jusqu’à la soudure du palier latéral sur la cloche.

Du fait que la soudure est circulaire, il est nécessaire de souder avec un outil avec pion rétractable. C’est la seule technologie d’outil ne laissant pas de trou en fin de cordon. L’outil sera choisi avec un épaulement lisse concave. Une fois l’outil défini, la surface d’appui minimum de l’enclume peut être déterminée. Il s’agira d’une des surfaces fonctionnelles du montage. La trajectoire de l’outil sera également déterminée.

La conception du montage de soudage FSW du palier sur la cloche doit répondre à certaines contraintes liées au FSW :

- Une enclume doit être apposée à l’envers de la soudure pour contenir la matière malaxée
- L’outil doit pouvoir accéder à la soudure
- La pièce assemblée doit pouvoir être sortie du montage
- Le montage doit être dimensionné pour résister aux efforts de soudage

Pour le dimensionnement du montage il est nécessaire d’obtenir les efforts de soudage. Ces derniers sont l’effort de forge et les efforts d’avance et transverse. Ces trois composantes de la résultante du torseur des efforts outil/pièce peuvent être déterminées au cours de l’identification du domaine de soudabilité opératoire (DSO). Contrairement aux procédés de soudage par fusion, au DSO il peut être nécessaire d’associer les efforts de soudage. Le DSO est défini expérimentalement sur des pièces de forme simple (coupons) conservant localement les mêmes caractéristiques que la pièce à souder : matériaux, épaisseur, configuration géométrique et comportement thermique du montage.

Pour le soudage du palier sur la cloche les paramètres de soudage et les efforts outil/pièce obtenus sont donnés sur le tableau 2.

Alliage	Vitesse de soudage (mm/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Effort de forgeage (kN)	Effort d’avance et transverse (kN)
AlSi7Mg0.6/AlSi13	10	900	8	1,6

TAB.2 – Paramètres de soudage et efforts de soudage

Pour minimiser les écarts entre la trajectoire programmée et la position réelle du joint de soudage, le même montage est utilisé pour le soudage et pour la réalisation de la préparation du bord dans la cloche. Pour cela, l’enclume est remplacée par une pièce ayant un diamètre intérieur supérieur et permettant un dégagement de l’outil d’usinage. La mise en position des deux enclumes sur le montage est similaire. On utilise ici le fait que la soudure, tout comme l’opération d’usinage, est réalisée de proche et proche par un outil tournant. La cloche est considérée comme la pièce « maître » lors du montage. Sa mise en position est complète par rapport au montage. Le palier est mis en position à la fois par rapport au montage (appui plan sur l’enclume)

et à la cloche (linéaire annulaire + appui ponctuel). Entre l'opération d'usinage des bords de la cloche et l'opération de soudage FSW, la mise en position est conservée. Le montage de soudage du palier sur la cloche est présenté sur la figure 6. Celle-ci fait également apparaître les systèmes de bridage prévus.

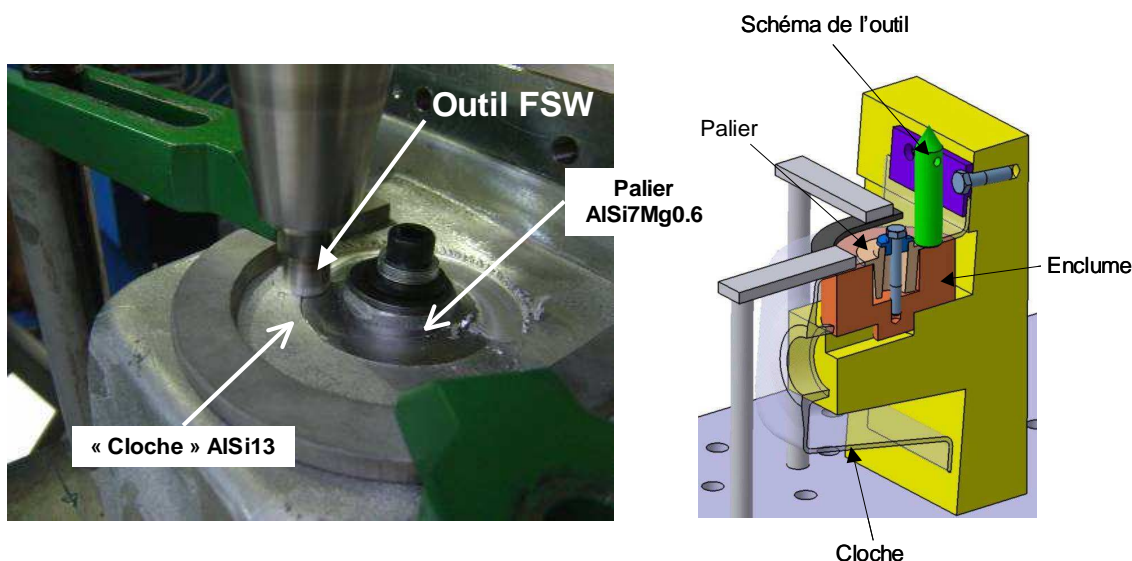


FIG.6 : Montage de soudage du palier sur la cloche

Le procédé de soudage FSW est suffisamment tolérant pour autoriser un jeu entre les pièces à assembler de l'ordre de 10% de l'épaisseur à souder. Dans le cas du soudage du palier latéral, l'épaisseur est de 4 mm. Ceci autorise donc un jeu maximum de 0,4mm, bien au-delà de ce qui est accessible par des moyens d'usinage « classiques ». De même, le procédé de soudage autorise une différence d'épaisseur entre les pièces avant soudage. Ceci est important dans la mesure où l'opération de fonderie engendre une légère dispersion sur les épaisseurs en fonction notamment de la dispersion liée à la mise en position relative des parties constituant le moule. De même, le procédé accepte un certain décalage entre l'axe de l'outil et l'axe du joint de soudure. Ceci est dû au fait que l'outil malaxe la matière sur une certaine largeur liée à la largeur du pion. Les défauts tolérés par le FSW sont représentés sur la figure 8.

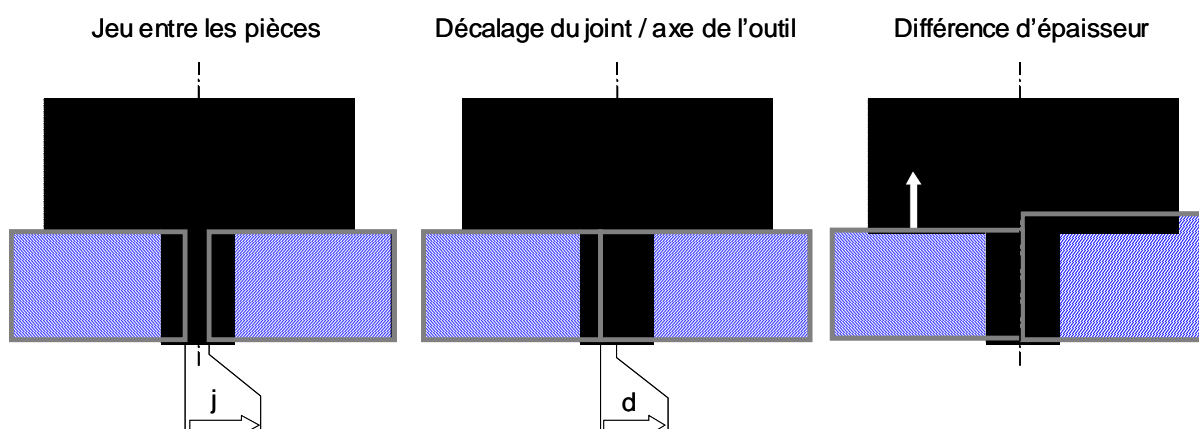


FIG.7 – défaut de préparation des pièces et défaut de suivi de trajectoire

Le tolérancement du montage de soudage ainsi que celui des pièces avant soudage nécessite la détermination

de la valeur admissible de ces trois défauts.

Sur la figure 9, une macrographie de la soudure FSW d'un des coupons AlSi7Mg0.6 sur AlSi13 est présentée. Sur la micrographie, on peut remarquer que la structure dans le noyau de la soudure a une structure plus fine que celle des matériaux de base. Conformément aux résultats de plusieurs travaux de recherche [3-4], le malaxage permet une recristallisation de l'alliage sans formation de dendrite. De même, la compacité du joint soudé est meilleure que celle du matériau de base par suppression notamment des porosités.



FIG.8 – Macrographie de la soudure FSW AlSi7Mg0.6 sur AlSi13 moulés

### 3 Conclusions

L'étude et la réalisation du démonstrateur ont permis de mettre en évidence le potentiel du FSW pour le soudage d'alliages de fonderie et d'alliages sensibles à la fissuration à chaud. Les possibilités de soudages hétérogènes entre différentes nuances d'alliage d'aluminium (composition et mode d'élaboration) ont également été démontrées. Pour pouvoir conduire la réalisation d'une telle pièce, l'enrichissement de la démarche de définition du domaine de soudabilité opératoire par rapport au soudage par fusion est nécessaire. Il faut notamment déterminer les efforts de soudage en chaque point du domaine de soudabilité. Il est nécessaire également de définir le domaine de tolérance sur la définition des préparations de bord ainsi que sur la position et l'orientation de l'outil par rapport au joint.

La réalisation d'une pièce optimisée en termes de fonctionnalité (nuance, géométrie...), de coût de fabrication passe par une intégration complète du procédé FSW. Celle-ci impose une reconception du produit prenant en compte les contraintes et spécificités liées à la mise en œuvre du procédé FSW :

- accessibilité de l'outil à la soudure
- confinement de la matière lors du malaxage, ce qui se traduit par la nécessité de placer une enclume à l'envers de la soudure et d'avoir une surface d'accueil de l'épaulement plane ou de faible courbure
- la tenue des moyens de production (machine et montage) aux sollicitations mécaniques outil/pièce

Le travail présenté ici n'est que la première étape d'une étude plus large concernant l'industrialisation du procédé FSW et plus particulièrement l'identification de ses paramètres clefs vis-à-vis de son intégration procédé-processus-moyen de production.

### References

- [1] R.S Mishra, Z.Y. Ma. "Friction Stir Welding and processing". Materials Sciences and Engineering R 50 (2005) 1-78
- [2] S. Zimmer, J. Laye et al. « FSW: Un procédé de soudage pour les alliages d'aluminium de fonderies », 11<sup>ème</sup> colloque National AIP-PRIMECA, 2009
- [3] Y.G. Kim, H. Fuji et al. « Effect of welding parameters on microstructure in the stir zone of FSW joints of aluminium die casting alloy », Material Letters, 60 (2006) pp3830-3837
- [4] Z.Y. Ma, S.R. Sharma et al. « Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminium », Materials Science and Engineering, A433 (2006) pp269-278
- [5] W.B. Lee, Y.M. Yeon et al. « The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy », Material Science and Engineering, A355 (2003) pp154-159